

Interview

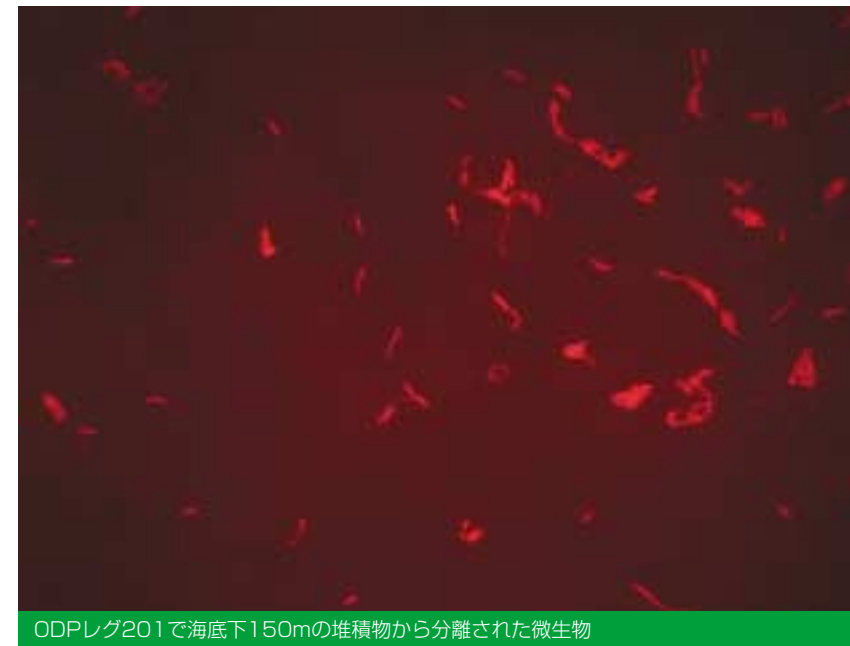
研究者・技術者に聞く

稲垣 史生 研究員

極限環境生物フロンティア研究システム
地殻内微生物研究領域

地下生命圏の研究から 海底下の豊かな微生物圏と 地球史と生命史との関係を探る

地殻内微生物の研究はまだ歴史が浅い。これまでにODP（国際深海掘削計画）の掘削によって地殻内に大量の微生物が存在することが明らかとなっているが、どのような微生物がどこにどうやって生息しているのか、そもそも生きているのか死んでいるのか、といった多くの疑問が蓄積している。稲垣史生研究員は2000年4月から「地圏と生命圏との接点を探る」ことをテーマに地下生命圏の研究を開始。掘削コアの試料を分析し、特定の地質条件下に存在する特異な活動的微生物の生態系を研究している。深海から海底下深部へ広がる極限環境より、新奇な微生物を多数発見するとともに、微生物を通して初期地球から生命がどのように進化していったかの謎に迫っている。



ODPレグ201で海底下150mの堆積物から分離された微生物

Blue Earth編集部（以下BE） どのようなきっかけで、地殻内微生物の研究に着手したのですか。

稲垣 学生時代は放線菌の抗生物質生産や乳酸菌を研究している遺伝子工学講座に在籍していましたが、講座で研究されていた応用微生物学よりはむしろ、どこにどのような微生物がいるのだろう、どうやって生きているのだろう、といった微生物の生態に興味がありました。そんなある時、工学部の先輩が「地熱発電所の150℃くらいの熱水から形成される鉱物を顕微鏡で見ると微生物のような変な形のものが見える」というのです。半信半疑のまま発電所に連れて行かれ、鉱物からDNAを取ってみたのが、極限環境微生物を研究するようになったきっかけです。いっぺんにのめりこんでしまい、たまたま海洋科学技術センターで地下生物圏がクローズアップされつつあった時期にここに来ました。

BE 地殻内には非常にたくさんの微生物が存在するのだそうですね。

稲垣 ええ、海底下1kmの深さまでに1ccあたり10の5乗を超す細胞がいるといわれています。ただし海底下の微生物は活動的（生きている）な微生物群集と非活動的（死んでいる、もしくは休眠している）な微生物群集に分かれているようです。海底下の生命圏はこの両方から構

成されていますが、全体的には非活動的な微生物が多く、非常に静かな生命圏なのです。

非活動的とはいえ、そのような微生物も非常に重要です。微生物は生息環境に非常に多様性があり、普通の真核生物が死に絶えている時代や生存できないような極限環境でも微生物なら遺伝子情報が得られます。その微生物の系統と現在の微生物の遺伝学的な類似性を調べることで、過去の地球環境をある程度想像することができます。

たとえば1億年前の白亜紀にはOAE（海洋無酸素事変）という事件があって、海が一時的に非常に還元的な環境になり、多くの生物が死に絶えました。微生物は酸素の濃度異常に敏感にコミュニティを変えますから、嫌氣的な時期には酸素を使わずに硫酸や鉄などを還元して生きる微生物が多かったはずです。過去の地質に閉じ込められた微生物や微生物が作った鉱物などを調べることによって、その時代の地球に起こったこ

とがよりくわしく見えてきます。

BE 活動的な微生物はどんな条件の場所に生息しているのですか。

稲垣 それが今、まさに地下生物圏研究の焦点となっています。地球の70%は海洋ですが、その地下のほとんどは非常に静かな生命圏です。微生物が生育するにはエネルギーの獲得と生育場所が必要となりますから、エネルギーのフローがあって水が循環している、地質学的に活発な場所にいるだろうと考えられます。それは深海底熱水噴出孔周辺の海底下環境や、中央海嶺系、付加体、ダイアピルなどの場所だと思われます。

そこで地圏と生命圏の接点を探ることが重要になります。深海底のさらに下はまだほとんど調べられていないので、もしかしたら原始時代の地球に発達した微生物群集が当時の面影を残したまま存在しているかもしれません。生命進化を考える上で、非常に重要な知見が得られると思うし、新しい微生物を発見できる可能性がある。新しい微生物の分離培養に成功すれば、これまでになかった遺伝子資源として産業的にも重要になってきます。

微生物学の立場から 船に乗り込んで試料を採取

BE 研究に必要なサンプルはどのようにして入手するのですか。

稲垣 ひとつは熱水活動域です。熱水孔は地下生命圏の窓ともいわれています。



深海底から採取した熱水やコア堆積物、岩石などに含まれる微生物を研究室で分析している

Interview 研究者・技術者に聞く

沖縄トラフをはじめとした様々な熱水活動域から、潜水船などを使ってサンプルを採取しています。あとは掘削コアです。様々な掘削計画に積極的に参加し、試料を採取して解析します。

今私が研究しているのは、ODPレグ201航海（ペルー沖）とレグ204（カナダ・カスカディア沖）の掘削コアです。昨年ODP201と204の航海で、世界で初めて微生物学者と地球科学者による海底下深部掘削が行われ、僕はペルー沖の航海に乗船しました。船上ではメタンや硫酸をはじめとする様々な化学成分や地質特性が解析され、同時に、微生物解析用の嫌気処理や無菌操作が行われたのです。現在、そのコアのなかから遺伝子を取り出しPCR（ポリメラーゼ連鎖反応）で増幅して、遺伝子の塩基配列から海底下にどんな微生物がいるのかを調べています。

BE そこからどのようなことがわかりますか。

稲垣 レグ201と204で掘削されたコアの中には次世代のエネルギー資源と



ODPレグ201航海では船内の冷蔵庫で全てのコアの微生物処理が行われた



掘削コアから有毒な硫化水素が発生するためマスクをして作業をする

いわれるメタンハイドレートを含むものがあります。メタンハイドレートを作るメタンは生物起源のメタンと有機物の熱分解起原でできたメタンの2つに大別されますが、201と204には生物起源のメタンが非常に多い。しかし実際に海底下のどこで作られているのか、作っているのはどんな微生物かについてはわかっていません。現在の研究から、これまでに知られているメタン生成アーキアとは違う系統のアーキアが深さ50mまでのコア表層に多く存在していることを突き止めました。おそらくこれらの微生物がメタンの生成に大きく関与しているかもしれませんが、鉛直的に海底下の微生物群集構造を見ることで、海底下生命圏の姿と地球環境との関連性が見えてきたのです。

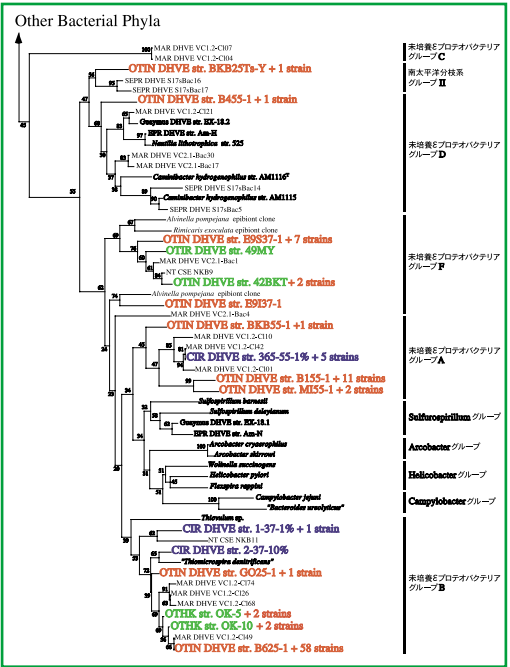
BE 沖縄トラフの熱水孔についてはどのような調査をしていますか。

稲垣 昨年「しんかい2000」に乗り、伊平屋北の熱水活動域で、熱水孔を中心に広がる酸

化還元勾配や地温勾配に対応する微生物相を調べました。熱水孔からは300℃を超える嫌気的な熱水が冷たい酸化的な海水の中に噴出しているの、その間には物理化学的な勾配があります。その極限環境で微生物は巧みな棲み分けをしています。さらに熱水孔の下には、生命圏の3次元的な広がりがあるはずです。今後はそれらの微生物活



深海底熱水活動域に生息するεプロテオバクテリア



「εプロテオバクテリアの系統樹」
沖縄トラフをはじめとする深海底熱水活動域から多くの新しいεプロテオバクテリアが分離され、生理・生化学的生育特性が明らかとなった

動が地球の炭素循環や硫黄循環などの化学的な物質循環にどのような影響を与えているのかを見ていきたいです。

また熱水活動域からは、とてもたくさんの菌が分離されています。たとえばプロテオバクテリアというひとつの大きな系統がありますが、その系統群はα、β、γ、ε、δというサブクラスに分かれています。熱水孔にはεサブクラスに属する菌が非常に多いことはわかっていました。しかし菌が存在することはわかっても培養が成功しておらず、その生理機能や代謝は未知でした。去年の航海では少なくとも10数種類は新属レベルでεに属する菌を分離しました。今まで未解明だった系統群が一気にその性状を明らかにし、続々と新属・新種の登録がさ

れています。これはグループ全体としても大きなトピックでした。

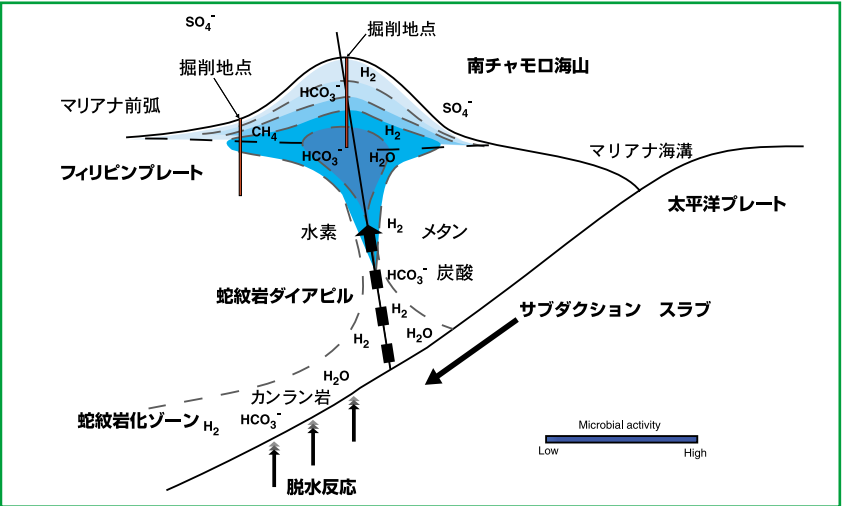
BE 今年も沖縄に行かれるんですね。

稲垣 今年は伊平屋北だけではなく伊是名海穴でも約10年ぶりに調査を行います。ここは300℃を超える熱水孔や、液体の炭酸ガスハイドレート、厚さ30cmを越す元素状硫黄のテラスなどがあります。それらの環境にどのような代謝経路の微生物が生息しているのかを、培養や遺伝子解析、化学分析や同位体解析などによって調べます。

私たちは、沖縄トラフの熱水活動域についてIODPに掘削のプロポーザルを出し、掘削に先立って微生物学の立場から潜水調査船を使った事前調査を行っています。沖縄トラフは中央海嶺型の熱水孔ではなく背弧海盆型の熱水孔で大陸の河川によって運ばれた有機物を豊富に含む堆積物に覆われています。微生物の成育を支える環境条件が整っており、多様で肥沃な海底下生命圏があるだろうとにらんでいます。

BE 熱水孔以外の地質学的な活動域についてはどうですか。

稲垣 マリアナの前弧域の蛇紋岩海山に着目しています。上部マントルに沈み込んだ海洋底スラブが熱せられ蛇紋岩のダイアピルが上がってくる場所です。プレートの沈み込みによっておこる海底下深部の化学反応で微生物の生育に必要な



「未知の海底下深部生命圏」
マリアナ前弧域の蛇紋岩海山の深部には、未知の超アルカリ性始原的微生物圏が存在する可能性がある



研究室に設けられた嫌気グローブボックスを使って作業する稲垣研究員

水や水素、炭化水素、炭酸などが発生するので、活動的な微生物の棲みかである可能性があるのです。

また、蛇紋岩海山の近くはpHが9.5から最大で12.5と地球海洋環境の中でもっとも高アルカリ性です。これはすなわち特異な環境独自の生命圏がある可能性を意味しています。地球深部から発生する無機物を食べる、特殊で始原的な微生物生命圏があるのではないかと考えています。もし存在するのであれば、そこは地球上に残された地圏と生命圏の接点です。もしかしたらこのような場所で最初の生命が生まれたのかもしれない。

BE これから研究を進めるうえで、最も関心を持っていることはなんですか。

稲垣 地球外の生命圏に関心があります。アメリカを中心にアストロバイオロジーという分野が展開されていますが、私は火星にも生物がいると思っています。

火星の生命探査においても、キーとなるのは地下の生命圏でしょう。去年のマースオデッセイの成果で、火星の緯度60度以北または以南の浅い部分に永久凍土があることがわかってきました。永久凍土には地球の始原的微生物のような生命が閉じ込められている可能性があります。もちろん、生きていたっていい。地下数メートルの永久凍土からランチャーで無菌的なコアをとってくれば、フリーラジカルによる生体高分子の分解などの問題もありますが、地球型の生命であれば検出できるかもしれません。惑星間で生命の移動があるという説もありますから、火星で生命が生まれて地球に運ばれてきたと考えてもおかしくない。地下生命圏の研究を進めていくと、地球だけではなく火星やエウロパなど生命の可能性のある地球外惑星の探査とリンクしていくのです。

地球上の生物のDNAは4種類の塩基が二重螺旋を作っていますが、地球外ではそれが2種類だったり、6種類だったりするかもしれませんね。僕はけっこう地球に似ているんじゃないかと楽観的に考えています。

とにかくやることはたくさんあります。陸域の地下生命圏も調べていますし、調査のためには微生物だけでなく、地質や無機化学、有機化学、同位体などについても知識が必要です。将来的には地球という生命システムの中で微生物学を位置づけ、地球微生物学といった学問分野を確立していく意気込みで研究を行っています。